

# **SIMULACION MEDIANTE SIMEDIF DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN PROTOTIPO DE VIVIENDA LIVIANA CONSTRUIDO EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA**

Alejandro Hernández y Graciela Lesino<sup>1</sup>

INENCO, Universidad Nacional de Salta, CONICET  
Calle Buenos Aires N° 177 - (4.400) - Salta  
T.E.: 54 - 387 - 4255424 - Fax: 54 - 387 - 4255489  
E-mail: alejo@ciunsa.edu.ar

## **RESUMEN**

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la simulación de un prototipo de vivienda liviana construido en la UNSa y se expone la metodología a seguir para incorporar ganancias auxiliares de calor (estufas o luminarias) dentro del SIMEDIF. Primeramente se expone la validación del modelo mediante valores medidos durante el mes de Julio de 1993. El acuerdo entre valores medidos y simulados es del orden de 1 °C para todos los locales estudiados. Las mediciones evidenciaron la necesidad de recurrir a calefacción auxiliar en los locales habitables dado que sus temperaturas se encuentran por debajo del rango de confort térmico teórico en invierno. Lograda la validación del modelo térmico del prototipo se procedió a simular su comportamiento bajo condiciones meteorológicas de verano. En este caso, la simulación demuestra que las temperaturas de los locales habitables están dentro del rango de confort por lo que no es necesario recurrir a estrategias de enfriamiento estivales.

Palabras claves: *medición, simulación, edificio, rango de confort.*

## **INTRODUCCION**

En el año 1993, en julio, se efectuó el monitoreo de un prototipo de vivienda liviana construido en la UNSa por la empresa constructora local CASAS CONTEMPORÁNEAS S.A., a través de un convenio firmado con la Universidad. Los muros constan de paneles premoldeados compuestos de una mezcla de granulado volcánico y cemento, figurando su descripción detallada figura en un trabajo anterior (Hernández y Lesino, 1993). Posteriormente se aplicó a los datos obtenidos el método de evaluación térmica P.S.T.A.R. (Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization) que consiste en la determinación de ciertos coeficientes que ajustan, a partir de los datos medidos, los términos de mayor importancia dentro del balance térmico de un edificio (Hernández y Lesino, 1994). En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la simulación del comportamiento térmico del prototipo haciendo uso del programa SIMEDIF. A partir de los datos medidos en aquella oportunidad se obtuvo, por ajuste, la descripción física del edificio que permitió que las curvas arrojadas por el simulador concordaran con las mediciones dentro de 1 °C de error. Finalmente, se utilizó dicha descripción para simular el comportamiento térmico del prototipo bajo condiciones meteorológicas de verano y sus resultados son expuestos en este trabajo.

## **INCORPORACION DE GANANCIAS INTERNAS DE CALOR AL SIMEDIF**

La versión anterior de SIMEDIF no contemplaba la posibilidad de incluir ganancias internas de calor (tipo estufas) en cada habitación, salvo para edificios de un solo local. Dado que el protocolo de monitoreo aplicado durante las mediciones incluía períodos de calefacción auxiliar en cada local por separado, se modificaron los códigos fuentes, tanto del SIMEDIF1 como del SIMEDIF2, agregando las sentencias necesarias para incluir dichas ganancias auxiliares de calor.

Dado el carácter aleatorio que puede tener el encendido y apagado de una estufa, de las luminarias de filamento caliente o de cualquier otro artefacto eléctrico (principales fuentes auxiliares de calor), se decidió que el ingreso de sus valores (en Watts) fuera hecho a mano, hora por hora y no mediante una función algebraica del tiempo predefinida. Según este criterio, al correr la opción 3) "**Conversión de datos meteorológicos**" del programa SIMEDIF1 se modifica el archivo con extensión ".rrr", agregando una columna, por cada local, con valores 0 para cada hora. Una vez corrido el SIMEDIF1, se debe ingresar al archivo correspondiente con cualquier editor de textos ASCII y llenar, a mano, cada columna de ceros con los valores de las respectivas ganancias auxiliares, si las hubiera. El orden de las columnas corresponde al del ingreso de los locales durante el período de descripción del edificio.

Tanto en el caso en que los valores de las ganancias fueran constantes durante todo el período de simulación como si variaran temporalmente mediante una función conocida, se pueden ingresar sus valores abriendo el archivo ".rrr" con una planilla de

---

<sup>1</sup> Investigador de CONICET

Parcialmente financiado por ANPCYT y CIUNSA

cálculo, definiendo tal función para la primer celda y copiándola en todas las celdas de la columna. Al grabar, se debe salvar el archivo en formato de texto y no de planilla de cálculo. Este procedimiento puede emplearse también en el caso en que la temperatura ambiente o la radiación correspondiente a cada índice de radiación, incluidos en el archivo ".rrr", fueran valores medidos y no los simulados internamente por el SIMEDIF1.

Una vez corregido el archivo, se corre el programa SIMEDIF2 el cual se encarga de realizar los cálculos teniendo en cuenta las ganancias de calor auxiliar agregadas. Cada vez que se deba correr el SIMEDIF1 para modificar algún parámetro, se debe tener especial cuidado de no volver a correr la opción 3) pues esto modificaría el archivo ".rrr" restaurando los valores de temperatura ambiente y radiación calculados internamente y volviendo a "0" los valores de las ganancias auxiliares.

## VALIDACION DE LA DESCRIPCION FÍSICA DEL PROTOTIPO

En la figura 1 (a) se muestra un esquema en planta del prototipo y en la (b) el corte A - A donde se aprecia la cámara de techo, la posición de algunos sensores de temperatura y radiación solar y la ubicación de la estufa de calefacción auxiliar.

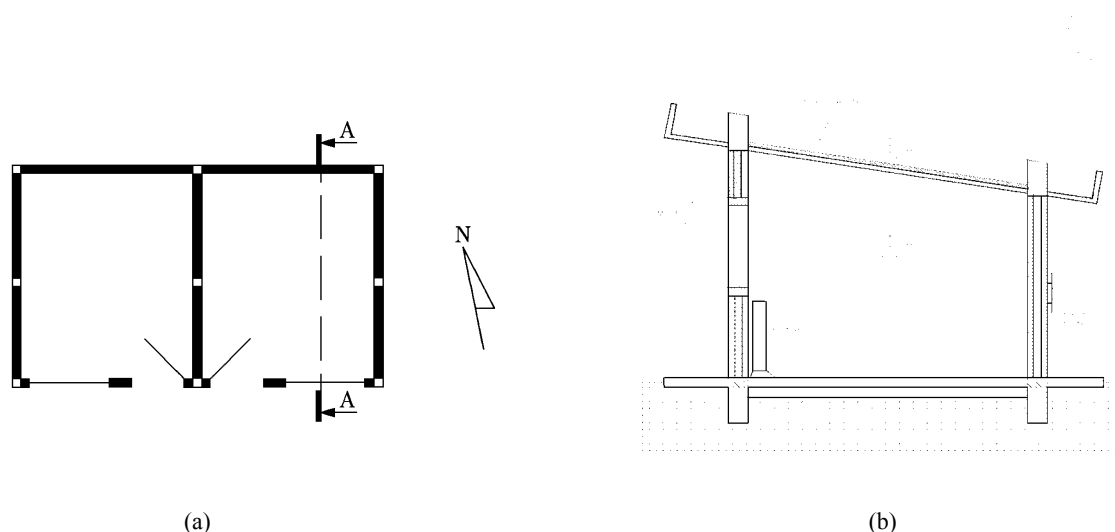


Figura 1: (a) Vista en planta del prototipo y (b) Corte A-A donde se visualiza la cámara de techo del local al este.

Mediante el uso del SIMEDIF se obtuvo la descripción física del prototipo que fue validada con los datos medidos dentro de un error de 1 °C. Los valores de las propiedades térmicas de los distintos materiales constituyentes del edificio fueron extraídos de tablas (Incropera y DeWitt, 1990), salvo los de los paneles premoldeados que fueron medidos en el INENCO, Salta (Hernández, 1992).

Debido a la complejidad propia de la estructura de los paneles (sectores con y sin aislación de poliestireno expandido en su interior), las primeras corridas del SIMEDIF con una descripción simplificada del prototipo no condujeron a un buen acuerdo entre los valores medidos y simulados, razón por la cual se debió aumentar el nivel de detalle de las paredes para tener en cuenta las juntas compuestas de granulado volcánico y cemento y la jaula antisísmica de hormigón puro. Estas áreas representan el 50 % de los muros mientras que el otro 50 % corresponde a los sectores de los paneles que poseen aislación térmica en su interior. En el caso del suelo por debajo del edificio, se contempló una extensión de 4 m en profundidad, con propiedades físicas correspondientes a suelo de arcilla seca.

Las cámaras de techo están separadas del ambiente exterior mediante chapas galvanizadas avejentadas las que, desde el punto de vista radiativo, se comportan como superficies selectivas calientes (alta absorptancia, 0.8, en el rango visible y baja emisividad, 0.28, en el infrarrojo lejano). Sin embargo, el depósito de polvo o suciedad en la superficie exterior tiende a aumentar su emisividad infrarroja, convirtiendo a la chapa en un material que absorbe mucha energía durante las horas de sol, calentándose en consecuencia, y emite otra cantidad importante de energía hacia la atmósfera durante la noche, enfriándose en algunos casos por debajo de la temperatura ambiente, dependiendo del contenido de humedad atmosférico y de la cobertura nubosa del cielo. Es así que, durante el período de monitoreo, las cámaras de techo de ambos locales se enfriaron por debajo de la temperatura ambiente exterior dado que el clima invernal en Salta está caracterizado por un bajo contenido de humedad, con cielos muy limpios. Este comportamiento, que no puede ser tratado aumentando los coeficientes convectivos externos, fue simulado agregando una ganancia de calor interna **negativa** en ambas cámaras del orden de 300 W, dependiendo de la cobertura por nubosidad del cielo particular de cada día monitoreado.

Dada la gran masa de suelo considerada por debajo del edificio, se corrieron un total de 15 días. Para los 11 primeros días, necesarios para que todo el sistema alcance el estado estacionario, se empleó una radiación solar diaria media mensual sobre superficie horizontal de 13 MJ/m<sup>2</sup>-día y una temperatura ambiente media mensual de 9,9 °C, con 2,4 °C de mínima y 20,5 °C de máxima, valores obtenidos de tablas correspondientes a un día promedio del mes de julio en Salta. Para los restantes 4 días se emplearon los valores de radiación solar y temperatura ambiente medidos en el año 1993, entrados a mano, hora por hora.

## SIMULACION DEL PROTOTIPO BAJO CONDICIONES CLIMATICAS DE VERANO

Una vez lograda la validación de la descripción física del prototipo sobre la base de los datos medidos durante el invierno, se procedió a realizar la simulación de su comportamiento térmico bajo condiciones climáticas típicas del mes de Diciembre en Salta. A tal efecto se consideró una radiación solar diaria media mensual sobre superficie horizontal de 21 MJ/m<sup>2</sup>·día y una temperatura ambiente media mensual de 21,3 °C, con 15,2 °C de mínima y 28,3 °C de máxima, obtenidos a partir de tablas.

Para tener en cuenta la pérdida radiante hacia la temperatura de cielo se incluyó una ganancia auxiliar de -250 W en las cámaras de techo durante todo el período simulado y cuya justificación se da a continuación. La ecuación de balance de energía real contempla un término convectivo desde la chapa de la cubierta ( $T_p$ ) hacia la temperatura ambiente ( $T_a$ ), otro radiativo hacia la temperatura de cielo dada por  $T_{\text{cielo}} = (\epsilon_a)^{1/4} T_a$ , siendo  $\epsilon_a$  la emisividad infrarroja atmosférica, y uno convectivo hacia la temperatura del aire de la cámara ( $T_c$ ):

$$h_e (T_a - T_p) + h_i (T_c - T_a) = \epsilon_p \sigma (T_p^4 - \epsilon_a T_a^4) \quad (1)$$

donde  $h_e$  y  $h_i$  son los coeficientes convectivos exterior e interior respectivamente y  $\epsilon_p$  la emisividad infrarroja de la chapa.

La emisividad infrarroja atmosférica para Salta está dada por la siguiente ecuación (Frigerio y Saravia, 1991):

$$\epsilon_a = 0,767 + 0,55 (t_r / 100) - 0,26 (t_r / 100)^2, \text{ con } t_r = \text{temperatura de rocío en } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Por otra parte, la ecuación de balance del SIMEDIF, contemplando la ganancia auxiliar negativa de 250 W está dada por:

$$h_c \cdot A (T_c - T_a) + 250 = h_i \cdot A (T_c - T'_p), \text{ con } h_c = \text{coeficiente convectivo entre } h_e \text{ y } h_i \text{ y } A \text{ area de chapa} \quad (3)$$

Si  $T_p$  y  $T'_p$ , obtenidas respectivamente de (1) y (3) son similares, queda justificado el valor de la ganancia negativa empleado.

## RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 2 se observa la comparación de los datos medidos y simulados durante la etapa de validación, correspondientes al local y a la cámara de techo que dan al este.

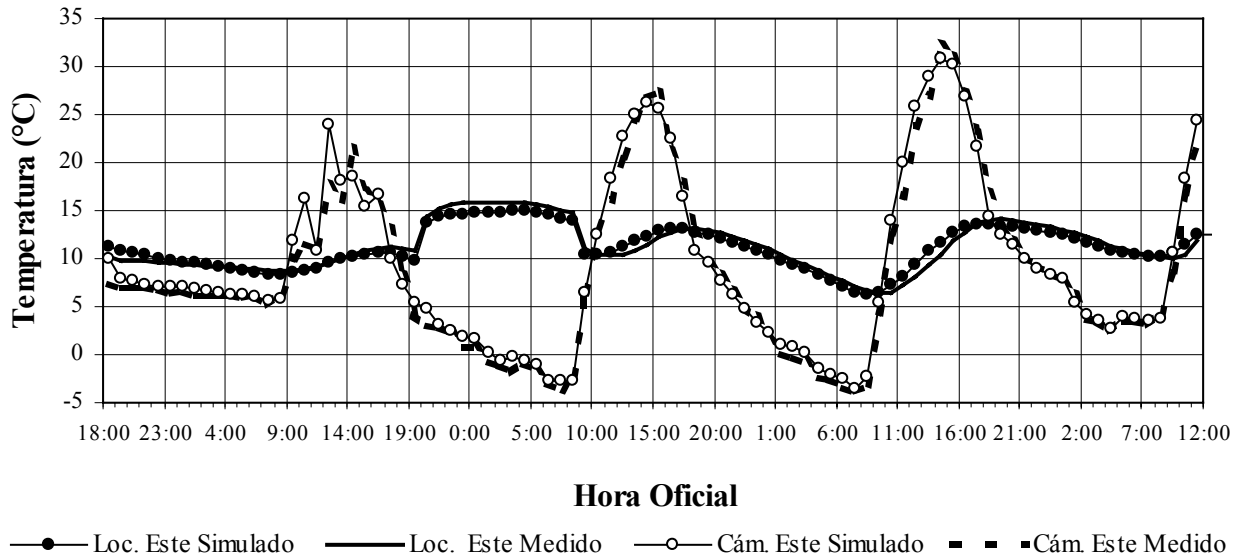


Figura 2: Comparación de datos medidos y simulados durante la validación para el local y la cámara de techo este.

En esta figura se observa que, tanto para el local como para su cámara de techo el acuerdo es suficientemente bueno (dentro de 1 °C de error), salvo para la primera mañana graficada, la cual se presentó seminublada y el ingreso a mano de los valores de radiación resultó dificultoso pues los datos estaban tomados cada 15 min. mientras que el SIMEDIF trabaja con valores cada una hora. El incremento de temperatura dentro del local durante la segunda noche corresponde al período de calefacción auxiliar mediante una estufa eléctrica con velas de cuarzo de 1.200 W de potencia, incluida en el SIMEDIF según se explicó más arriba. Si bien en la figura no está graficada la evolución de la temperatura ambiente medida, durante la segunda y tercer noche la temperatura de la cámara de techo estuvo por debajo de ella evidenciando la gran pérdida de calor por radiación hacia la temperatura de cielo (del orden de 20 °C menor que la ambiente) por parte de la chapa de la cubierta.

En la figura 3 se observa la comparación de los datos medidos y simulados, durante la etapa de validación, correspondientes al local y a la cámara de techo que dan al oeste. Nuevamente, el ajuste entre los datos medidos y simulados es muy bueno salvo para la primera mañana graficada. En este caso hay dos períodos de calefacción nocturna debido a que durante el primero hubo un corte de luz que dejó sin funcionamiento sólo a la estufa pues el sistema de adquisición de datos era alimentado con una batería de 12 V. El protocolo de monitoreo preveía la calefacción auxiliar durante toda una noche por lo que se volvió a calefaccionar la habitación durante la noche siguiente. En este caso, la temperatura de la cámara de techo descendió también por debajo de la ambiente durante los períodos nocturnos sin calefacción auxiliar debido a la radiación nocturna hacia la temperatura de cielo.

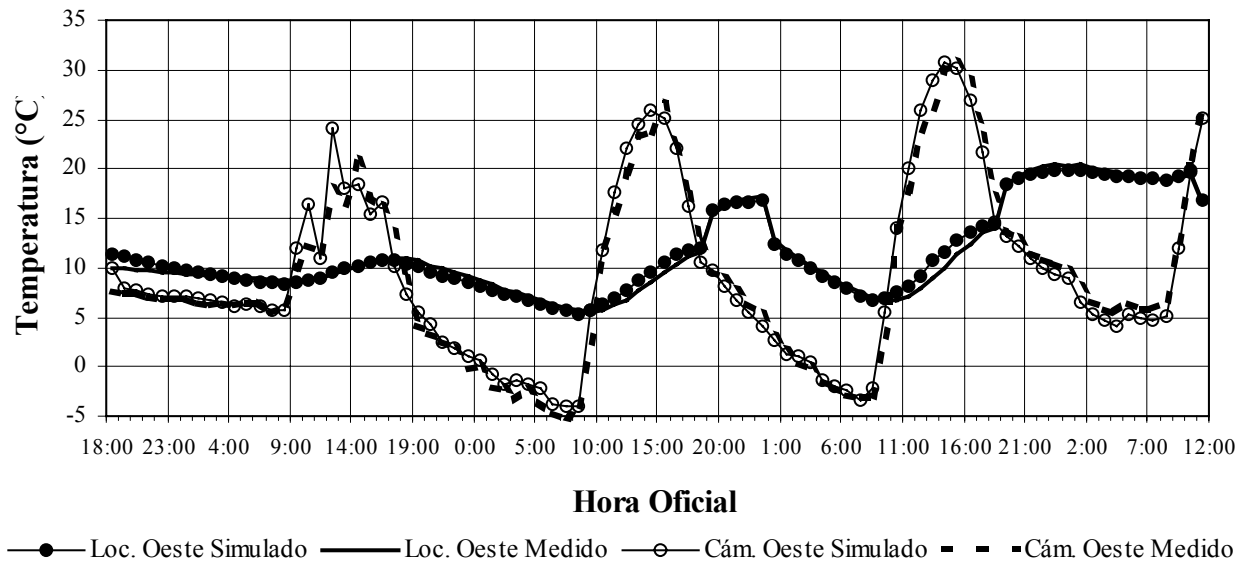


Figura 3: Comparación de datos medidos y simulados durante la validación para el local y la cámara de techo oeste.

Tanto el local este como el oeste se encuentran, en invierno, fuera de la zona de confort durante todo el día, incluyendo los períodos de calefacción. Esto evidencia la necesidad de emplear calefacción auxiliar durante esta época del año a pesar de que el fuerte calentamiento de las cámaras de techo logran subir la temperatura media de los locales unos 2,5 °C respecto de la media exterior no visualizada en las gráficas.

En la figura 4 se observan los datos obtenidos por simulación con SIMEDIF para condiciones meteorológicas de verano correspondientes al local y a la cámara de techo que dan al este.

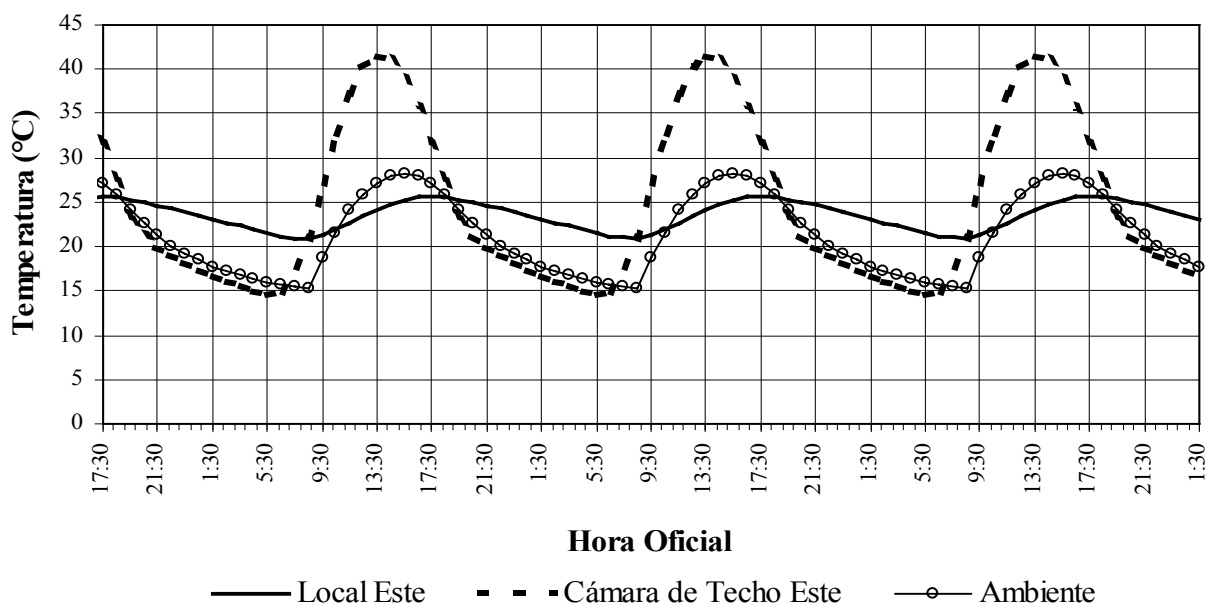


Figura 4: Datos simulados con condiciones meteorológicas de verano para el local y la cámara de techo este.

En esta figura se observa que el local este se encuentra dentro de la zona de confort durante todo el día y que su amplitud diaria es de 2,5 °C, con un valor medio de 23,3 °C. La oscilación diaria de la temperatura exterior tiene un valor medio de 21,6 °C lo que demuestra que, a pesar de que el edificio no posee ventanas al norte ni al este, igualmente tiene una ganancia de calor proveniente del fuerte calentamiento de la cámara de techo cuya temperatura llega a un valor máximo de 41 °C.

En la figura 5 se observan los datos simulados para condiciones meteorológicas de verano correspondientes al local y a la cámara de techo que dan al oeste.

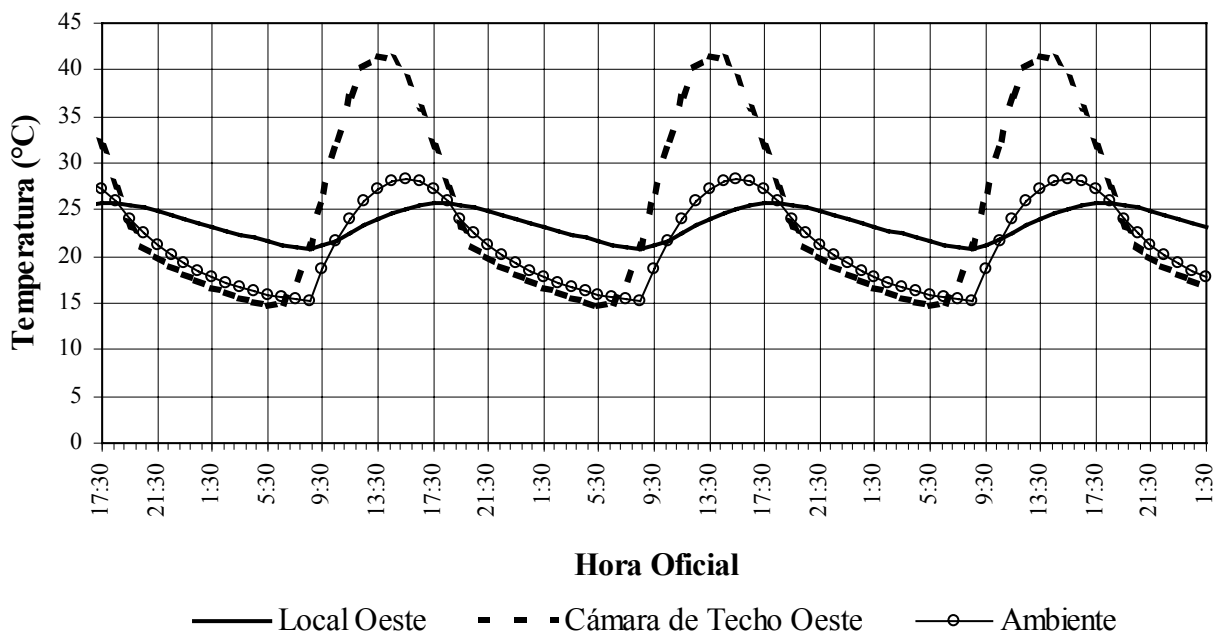


Figura 5: Datos simulados con condiciones meteorológicas de verano para el local y la cámara de techo oeste.

Tanto el local oeste como su cámara de techo tienen comportamientos similares a los del lado este. Sin embargo, el local oeste, al poseer arena en la constitución de sus paneles (material no incluido en los paneles del lado este), tiene una amplitud levemente superior a la del otro local (pues resulta más conductor del calor), estando su evolución temporal retrasada en una hora respecto de la del lado este, debido a que la arena aumenta su masa térmica.

Según se observa en las figuras 4 y 5, ambas cámaras de techo se enfrían por debajo de la temperatura ambiente exterior durante la noche debido a las ganancias auxiliares de -250 W incluidas para tener en cuenta la pérdida radiativa hacia la temperatura de cielo. Se utilizó un valor inferior que el de invierno para esta pérdida debido a que durante el verano aumenta el contenido de agua en la atmósfera.

A fin de justificar las ganancias de energía auxiliar impuestas en las cámaras de techo, se procedió a resolver las ecuaciones (1) a (3) para las variables  $T_p$  y  $T'_p$  con los siguientes valores de parámetros resultantes de la simulación:

$$\begin{array}{lll} h_e = 18 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C} & T_a = 16 ^\circ\text{C} & t_r = 14,5 ^\circ\text{C} \\ h_i = 8 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C} & T_c = 15 ^\circ\text{C} & A = 11 \text{ m}^2 \end{array}$$

El valor de  $T_p$  obtenido de la ecuación (1), para un valor de  $\epsilon_p$  de 0,6, es de 14,4 °C, mientras que el de  $T'_p$ , obtenido a partir de la ecuación (3), es de 12,9 °C, siendo su diferencia 1,5 °C. Dado que las temperaturas simuladas en invierno ajustan dentro de 1 °C y que en los cálculos se emplean coeficientes como el de la emisividad infrarroja de la chapa o los de transferencia convectiva que son asumidos o bien surgen del ajuste del modelo, se asume que este acuerdo es bueno, resultando así adecuadamente justificado el monto de la ganancia auxiliar empleado en la simulación.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió, mediante simulación computacional con SIMEDIF, el comportamiento térmico de un prototipo de vivienda liviana construido en un predio de la Universidad Nacional de Salta. Como primer paso, se procedió a obtener la descripción física del edificio, validando el modelo mediante los datos medidos en julio de 1993. A tal fin se modificaron los códigos fuentes del SIMEDIF1 y SIMEDIF2 a fin de incorporar las ganancias internas por fuentes auxiliares de calor, no contempladas en las versiones previas. El ajuste entre los datos medidos y simulados es del orden de 1 °C para todos los locales estudiados.

De acuerdo a los valores medidos, los locales habitables del prototipo se encuentran fuera del rango de confort (20 a 26 °C), por debajo de su límite inferior durante el invierno, lo cual evidencia la necesidad de emplear calefacción auxiliar convencio-

nal (eléctrica o a gas) o solar pasiva con colectores calentadores de aire para lo cual se necesitaría, además, un acumulador tipo lecho de piedras dada la escasa masa térmica del prototipo.

Por su parte, las cámaras de techo se calientan por encima de los 30 °C durante los periodos soleados, ocasionando una elevación de la temperatura media de los locales habitables del orden de 2,5 °C por encima de la media exterior, y se enfrían por debajo de la temperatura ambiente durante las noches como consecuencia de la gran radiación térmica hacia la temperatura de cielo por parte de las chapas galvanizadas de las cubiertas. Este fenómeno de enfriamiento radiante ha sido medido durante el invierno.

Una vez validada la descripción física del prototipo, se procedió a su simulación bajo condiciones meteorológicas de verano con datos estadísticos de radiación solar y temperatura ambiente correspondientes al mes de Diciembre en Salta. En este caso las temperaturas de los dos locales habitables se encuentran dentro del rango de confort durante todo el día, no siendo necesario, por tanto, recurrir a ninguna estrategia de refrescamiento conocidas. Sus amplitudes diarias son de 2,5 °C, con valores medios del orden de 23,3 °C. Debido a que los muros del local oeste poseen, a diferencia de los del local este, arena en su constitución, su amplitud térmica es levemente superior y su evolución temporal se encuentra atrasada alrededor de una hora respecto de la del local este.

Las cámaras de techo se calientan hasta los 41 °C durante los periodos de sol, elevando las temperaturas medias de los locales en 2 °C respecto de la media exterior, y se enfrían durante la noche hasta 1 °C por debajo de la externa debido al enfriamiento radiativo de las cubiertas galvanizadas, efecto simulado agregando una ganancia de energía auxiliar negativa de -250 W (justificada teóricamente) en ambas cámaras. En la realidad, el enfriamiento radiativo se ve minimizado durante el periodo estival debido a la mayor concentración de agua en la atmósfera. Para confirmarlo sería necesario realizar nuevas mediciones entre los meses de diciembre y marzo.

Como futuro trabajo está planificado realizar la simulación térmica del prototipo durante el otoño y la primavera a fin de determinar durante cuánto tiempo debe recurrirse a la calefacción auxiliar a fin de que las temperaturas de los locales habitables estén dentro del rango de confort, evaluándose también la cantidad de energía necesaria para lograr tal fin en cada época del año.

## ABSTRACT

In this work, the results from the simulation of a lightweight building prototype constructed at the National University of Salta are shown. A methodology that includes the auxiliary heat gains (stoves or illumination) in the SIMEDIF is presented. First, the model is validated through measures taken during July, 1993. The agreement between the measured and simulated values is of the order of 1 °C for all the studied rooms. The measures evidenced the need for auxiliary heating in the living areas because their temperatures are below the theoretical confort-range for winter. Having done the thermal validation of the model, the behaviour of the prototype was simulated under summer meteorological conditions. In this case, the simulation shows that the living-areas temperatures are within the confort range so that there is no need for summer cooling strategies.

## REFERENCIAS

- Frigerio E. y Saravia L. (1991). Emisividad Infrarroja de la Atmósfera. Medidas en el Noroeste Argentino. *Anales AFA*, Vol.3. Tucumán.
- Hernández A. (1992). Determinación de las Propiedades Térmicas de Paneles Premoldeados. *Tesis de Licenciatura en Física*, Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta.
- Hernández A. y Lesino G. (1993). Análisis de la Performance Térmica de un Prototipo de Vivienda Liviana: Monitoreo y Simulación Macrodinámica. Parte I. *Actas de la XVI Reunión de ASADES*, Tomo I, pág. 167 a 174. La Plata, Buenos Aires.
- Hernández A. y Lesino G. (1994). Análisis de la Performance Térmica de un Prototipo de Vivienda Liviana: Monitoreo y Simulación Macrodinámica. Parte II. *Actas de la XVII Reunión de ASADES*, Tomo II, pág. 577 - 584. Rosario de Sta. Fe.
- Incropera F. y DeWitt D. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Third Edition, Appendix A, pp. A9 - A10. John Wiley & Sons, New York.